

Beschränkte Mikrowerkzeuge**Restriktionen bei der Konstruktion von Zahnradgetrieben für die Mikrotechnik**

Jochen Marz, Karlsruhe

Mit der zunehmenden Verbreitung von Mikrozahnradgetrieben wachsen auch die Anforderungen an die zu übertragende Leistung bei gleichzeitig fortschreitender Miniaturisierung. Die laufende Umstellung auf metallische und keramische Werkstoffe erfordert die Beachtung spezieller Restriktionen.

Mechanische Antriebssysteme der Mikrotechnik stehen heute an der Schwelle zum spartenübergreifenden Einsatz als Mittel- und Großserienprodukte. Bereits in vielen technologischen Anwendungsfeldern, wie beispielsweise der minimal-invasiven Chirurgie, finden sich mikromechanische Antriebskomponenten in Form von hochübersetzenden, mehrstufigen Getrieben. Dabei gilt es, die von entsprechenden Mikromotoren erzeugten hohen Drehzahlen und Leistungen möglichst wirkungsgradoptimal auf die geforderte Arbeitsdrehzahl bei höherem Ausgangsdrehmoment zu untersetzen.

Gerade an den letzten Getriebestufen fallen für den Werkstoff und die Zahndimension hohe Beanspruchungen an. Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Minimierung der äußeren Getriebemaße, geht der Trend weg von dem derzeit verwendeten POM-Werkstoff für die Zahnradkomponenten hin zu metallischen und keramischen Werkstoffen.

Realisierbare Herstellgrößen

Die Gestaltung von Mikrobauteilen orientiert sich sehr stark an den technologischen Möglichkeiten der fertigenden und abformenden Disziplinen.

Wesentliche Einflussgrößen auf die Konstruktion der Bauteile ergeben sich durch den zur Formeinsatzherstellung verwendeten Mikroschaftfräser. Tabelle 1 zeigt hierzu einen Ausschnitt der geometrischen und technologischen Merkmale.

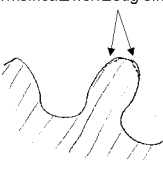
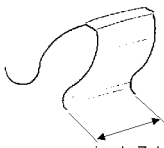
	Technologische Merkmale	Bedeutung für die Konstruktion	Auswirkungen
Schaftfräser	Durchmesser [mm] $d \geq 0,10$ Größenstufung [mm] $\Delta = 0,05$	Flankenrücknahme so, dass mit kleinstem Fräser noch in Formeinsatzwerkzeug einzufahren 	→ Reduzierung der tragenden Flankenlänge → Tragfähigkeit sinkt → Gleichförmigkeit/Rundlauf verschlechtert → Reduzierung der Zahnkopfbreite
	Spannutenlänge Faustformel $2-3 \times d$ mit verlängertem Schaft $\approx 8 \times d$	 maximale Zahnbreite bei gefrästem Formeinsatz mit Deckel	→ Tragfähigkeit eingeschränkt

Tabelle 1: Geometrische und technologische Merkmale von Schaftfräsern für die Mikrozerspanung

So bestimmt beispielsweise der Schaftdurchmesser die zulässigen minimalen Strukturbreiten, um das Formeinsatzwerkzeug noch fertigen zu können. Daran gebunden besagt die Faustformel $t \approx 2-3 \times d$, dass die zerspanfähige Nutenlänge lediglich das 2- bis 3-fache des Fräserdurchmessers beträgt. Ebenfalls durch den Fräser bedingt, ergeben sich zwangsweise vorzusehende Rundungsradien an Bauteilkonturen.

In gleicher Weise wurden auch die Parameter der Abformprozesse Mikropulverspritzgießen und Mikroguß, sowie für das im Rapid Prototyping eingesetzte Niederdruckspritzgießen ermittelt. Auch daraus lassen sich für den Konstrukteur zu beachtende Konstruktionsregeln und Gestaltungsprinzipien ableiten.

Da die Zerspantechnologie die vorrangige Restriktion bei der Miniaturisierung der Mikrobauteile darstellt, wird nachfolgend darauf näher eingegangen.

Dimensionierungskonzept der Verzahnungsgeometrie

Ausgehend vom kleinsten zur Verfügung stehenden Mikrofräser mit einem Schaftdurchmesser von $100 \mu\text{m}$ wurde im steten Abgleich zwischen „Global- und Feinbetrachtung“, d.h. zwischen den Auslegungsvorschriften für die gesamte Planetengetriebestufe und einer Detailbetrachtung des Zahnes und der Flankenkontur am Planetenrad als miniaturisierungskritischstes Bauteil ein erstes Dimensionierungskonzept erarbeitet.

Das Planetengetriebe folgt der typischen Bauform mit drei am Umfang im 120° Versatz um das angetriebene Sonnenrad positionierten Planetenrädern und Abtrieb über den Steg. Nach systematischer Variation der die Verzahnungsgeometrie beeinflussenden Parameter konnte bei einem Modul von $100 \mu\text{m}$ die Zähnezahzahl der Planeten zu 10 festgelegt werden, wodurch sich unter Einhaltung der Zähnezahzahlbedingung 12 Zähne für das Sonnenrad und 33 Zähne für das gehäusefeste Hohlrad ergeben.

Aus der Standübersetzung, beschrieben durch das Winkelgeschwindigkeitsverhältnis von Sonnenrad (Z) und Hohlrad (H) bei festgehaltenem Steg (S)

$$i_{0Z} = \frac{\omega_Z}{\omega_H} = \frac{Z_H}{Z_Z}$$

ergibt sich die Übersetzung des Umlaufgetriebes von Sonne/Steg zu [3]:

$$i_{ZS} = \frac{\omega_Z}{\omega_S} = 1 - i_{0Z} = 3.75$$

Um bei diesen weit unter den nach DIN 867 noch zulässigen praktischen Grenzzähnezahlen für die Radpaarung Sonne – Planet Hinterschnitt zu vermeiden, wurde für beide eine positive Profilverschiebung gewählt. Diese Maßnahme trägt einerseits zur Steigerung der Zahnfußfestigkeit als primäres Auslegungskriterium gegen Zahnbruch und zur Einhaltung einer für den Rundlauf geforderten Profilüberdeckung >1 bei, dient aber auch der Abformbarkeit der Bauteile. So schrumpft das Zahnrad nach erfolgtem Abguss während des Sinterprozesses gleichmäßig in alle Richtungen. Ein einzelner Zahn schrumpft somit nicht nur in seiner Dicke, sondern auch in radialer Richtung zur Mitte hin, so dass bei übermäßigem Hinterschnitt eine Zugbeanspruchung durch Anlage des unteren Abschnitts der tragenden Flanke am Formeinsatzwerkzeug auf den Zahnfuß wirken wird.

Die V-Plus-Verschiebung führt gleichzeitig zu einer Spitzenbildung der Zähne. Zu bedenken ist, dass der Fräser zur Erzeugung des Formeinsatzes entlang der Zahnkontur bis zum Zahnkopf zufahren muss. Dies bedeutet, dass einerseits die Zahndicke im Kopfbereich höchstens derart zulaufen darf, dass der im Durchmesser $100 \mu\text{m}$ messende Fräser gerade noch den Kopfkreisdurchmesser tangiert. Andererseits darf die sich dabei zwangsläufig ergebende Flankenrücknahme an der Kopfkante nicht die Unterschreitung der Mindestprofilüberdeckung bedeuten (Bild 1).

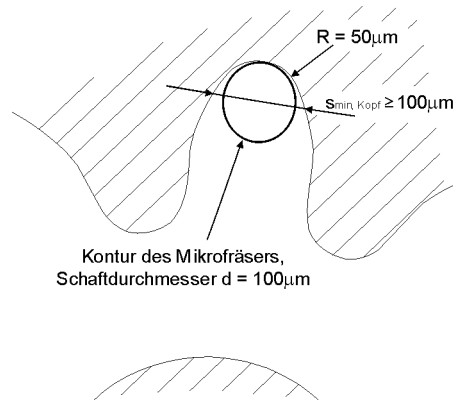


Bild 1: Durch den Fräserdurchmesser bedingte Restriktionen in der Festlegung der Geometrien am Zahnkopf

Diese fertigungstechnische Restriktion wurde bedacht, indem in Abweichung vom häufig nach DIN 867 verwendeten Bezugsprofil mit $\alpha = 20^\circ$ der Eingriffswinkel zu $\alpha = 10^\circ$ gewählt wurde. Neben einer runderen Flankenform wird im wesentlichen ein breiterer Zahnkopf erwirkt.

Fazit und Ausblick

Nach wie vor sind mikromechanische Bauteilkomponenten in ihrer Gestaltung sehr stark an die technologischen Randparameter der Formwerkzeug fertigenden und der abformenden Disziplinen gebunden. Zukünftige Arbeit wird sein, diese bei jeder Bauteilkonstruktion wiederkehrenden Restriktionen zu sammeln und konstruktionsrelevant interpretiert dem Entwickler in Form von Konstruktionsregeln und Gestaltungsprinzipien an die Hand zu geben. Dadurch soll ein phasenübergreifender Produktentstehungsprozess unter besonderer Berücksichtigung mikrospezifischer Einflüsse für metallische und keramische Bauteile begründet werden (μ PEP).

Literatur

- 1 Krause W.: >Konstruktionselemente der Feinmechanik<, 2. Aufl. München/Wien, Carl Hanser Verlag 1993.
- 2 Krause W.: >Zahnradgetriebe für Kleinst- und Mikromotoren<, aus >Innovative Kleinantriebe<, Tagung Mainz 09./10. Mai 1996, VDE-VDI-Gesellschaft Mikroelektronik; Mikro- und Feinwerktechnik, GMM.-Düsseldorf: VDI Verl. 1996.
- 3 Niemann G., Winter H.: >Maschinenelemente< Band II, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1983.
- 4 Roth, K.: >Zahnradtechnik< Band I, Band II, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1989.
- 5 Thürigen Ch.: >Zahnradgetriebe für Mikromotoren<, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 1, Nr. 326, Düsseldorf: VDI Verlag 2000.
- 6 DIN 3990: >Tragfähigkeitsberechnung von Gerad- und Schrägstirnrädern<.

Autor

Dipl.-Ing. Jochen A. Marz, Jahrgang 1974, arbeitet seit April 2000 als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH), Leitung: o. Prof. Dr.-Ing. A. Albers.